

SUR L'HYPOTHESE DE LA QUASI-STATICITE EN INGENIERIE DE VENTILATION

Ali ESBER^{1,2,3}, Xavier FAURE¹, François DEMOUGE³, Etienne WURTZ¹, Simon ROUCHIER²

¹Commisariat d'énergie atomique et alternative, CEA, France.

²Laboratoire optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement, LOCIE, France.

³Centre scientifique et technique du bâtiment, CSTB, France.

ali.esber@cea.fr

L'étude présentée s'inscrit dans le cadre d'un projet global qui vise à étudier les effets aérodynamiques induits par le vent extérieur sur la performance globale des systèmes de ventilation (énergie, qualité de l'air, humidité).

La conception et l'analyse du réseau de ventilation sont généralement effectuées à l'aide d'approches nodales (1 nœud pour chaque zone) et d'hypothèse quasi-statique. L'effet du vent, y compris sa turbulence même à une vitesse relativement faible, l'impact des tempêtes de vent, les perturbations internes du débit des conduits, impliquent des fluctuations de pression internes [Haghighat 1991] qui ne peuvent pas être prises par des hypothèses quasi statiques de codes nodaux.

La présente étude vise à identifier dans quels cas l'hypothèse quasi statique peut être faite. Des conditions limites simples sont appliquées sur une configuration simple avec une zone et deux conduits. Les résultats sont présentés sous une forme adimensionnelle. Le logiciel Mathis, développé pour analyser les systèmes de ventilation dans les habitations et choisi comme outil standard dans le contexte Français, est utilisé pour cette étude et validé à l'état instationnaire pour un cas de zone unique.

Mots-clés: Concept de quasi-staticité, Système de ventilation, Turbulence du vent.

The presented study is part of a global project that aims to study aerodynamic effects induced by the external wind on the global performance of ventilation systems (energy, air quality, humidity).

Ventilation network design and analysis are generally performed using nodal approaches (egg. 1 node for each zone) and quasi-static assumption. Wind effect, including its turbulence even at relatively small velocity, wind storm impact, internal vessel flow disturbance, imply internal pressure fluctuations (Haghighat 1991) that cannot be caught by quasi-static assumptions of nodal codes.

The present study aims at identifying in which cases the quasi-static assumption can be made. Simple stepwise boundary conditions are applied on a simple configuration with one zone and two duct. Results are presented in dimensionless form. The Mathis software, developed to analyze ventilation systems in dwellings and chosen as the standard tool in the French context, is used for this study and validated in unsteady state for a single zone case.

Keywords: Concept of quasi-staticity, Ventilation system, Wind turbulence.

1. INTRODUCTION

Suite aux préoccupations croissantes sur la performance énergétique des bâtiments, les systèmes de ventilation gagnent une grande importance. Les critères de conservation de l'énergie nécessitent d'inclure le système de ventilation dans la première phase de conception du bâtiment et de le concevoir conformément aux exigences de la qualité de l'air intérieur. La phase de conception du système de ventilation est réalisée à l'aide d'approches nodales. Afin de conserver un temps de calcul raisonnable, l'hypothèse quasi-statique est généralement appliquée pour le bilan massique conduisant à négliger toute résonance éventuelle de la pression interne. Mais lors de l'analyse de la résilience des systèmes de ventilation, des conditions limites transitoires particulières doivent être prises en compte. La turbulence de vent qui se propage à l'intérieur du bâtiment peut produire des perturbations et cause des dommages. La simulation de tels événements nécessite de vérifier la véracité de l'hypothèse quasi-statique. Cette étude vise à mettre en évidence l'hypothèse de quasi-staticité sous une forme adimensionnelle.

La prédiction des écoulements aérauliques dans les systèmes de ventilations des bâtiments nécessite au préalable une qualification des conditions limites et des variables globales à étudier.

Cela nécessite de créer une méthodologie permettant de développer des approches pour étudier le comportement aéraulique des réseaux de ventilation pour des écoulements permanents ou transitoires. Le logiciel MATHIS, développé pour la conception de systèmes de ventilation dans les bâtiments [Demouge 2017], est utilisé dans cette étude. La fiabilité du logiciel nodal Mathis consiste en une approche de modélisation numérique des liens entre les débits d'air, la température et l'humidité.

Les débits d'air seront étudiés et modélisés d'après les équations de transfert d'énergies mécaniques et de masses qui gèrent Mathis. D'abord les équations utilisées pour le développement théorique de la méthodologie seront analysées. Ensuite, l'adimensionnement de ces équations est réalisé pour faire une comparaison avec des résultats déjà obtenus en mesure adimensionnelle.

Plusieurs cas formeront la base de notre étude, tout d'abord en restant sur la configuration d'une seule pièce mais en changeant les conditions limites et les paramètres des ouvertures.

Les résultats seront analysés d'après le signal de la fluctuation de la pression [Holmes 1979]. L'essentiel de la tâche sera de préciser les conditions d'apparition de la résonance et dans quels intervalles de résistances aérauliques, ces perturbations peuvent être considérer négligeables. On déterminera dans quelles zones de fréquence et de résistance aéraulique le système sera robuste [LeROUX 2011].

Monajed (1989) a présenté plusieurs points à poursuivre comme la connaissance de la répartition des coefficients de pression ainsi que le comportement des ouvertures et il a bien insisté sur la validation expérimentale globale des modèles physiques utilisés pour les transfert d'air à travers les ouvertures.

Selon [Mounajed, 1989] « prendre en compte certains phénomènes qui ont été jusqu'à peu de temps considérés comme négligeables (comme la compressibilité de l'air dans "le sens" des grands volumes) ou bien modélisés d'une façon simplifiée (comme les fluctuations spatio-temporelles du vent) ».

2. METHODE ET MATERIEL

Un cas très simple est considéré dans cette étude. Il s'agit d'une seule zone reliée aux conduits pour l'inlet et la sortie respectivement (figure 1).

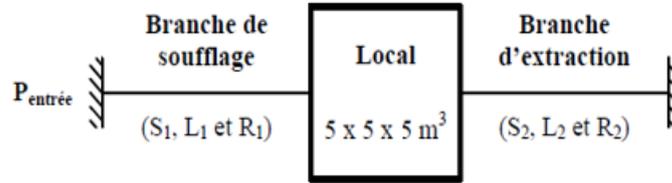


Figure 1 Zone de simulation

S, L et R sont respectivement la surface des conduits (m^2), la longueur (m) et la résistance (m^4) de chaque conduit avec l'indice 1 et 2 pour l'entrée et la sortie. Dans un premier temps, le logiciel MATHIS est validé à l'aide des résultats de LeRoux (2011) qui a fait des simulations similaires avec SYLIVA, un logiciel nodal pour la conception de ventilation des centrales nucléaires. Dans un deuxième temps, une forme adimensionnelle est proposée pour les simulations paramétriques pour couvrir plusieurs cas modifiant soit la résistance, la longueur des conduits, soit le volume de la zone.

3. VALIDATION DU MODELE DEVELOPPE SOUS MATHIS

Un échelon de pression de 2000 Pa est imposé au conduit d'entrée de la pièce afin d'étudier sa propagation dans le cas présenté à la figure 1. La durée de cette étape est de 150 s avec un pas de temps de 0.005 s selon Le Roux (2011). Les résultats sont analysés par le signal de fluctuation de pression interne et plusieurs caractéristiques sont calculées à partir de celui-ci. Comme indiqué dans la figure 2, quatre paramètres sont calculés: la fréquence (l'inverse de la période), le temps nécessaire pour atteindre 5% du régime établi (T_r 5%), le temps de montée (atteindre 90% du régime établi) (T_m), et le pourcentage de dépassement (en utilisant D1). [Holmes 1979]

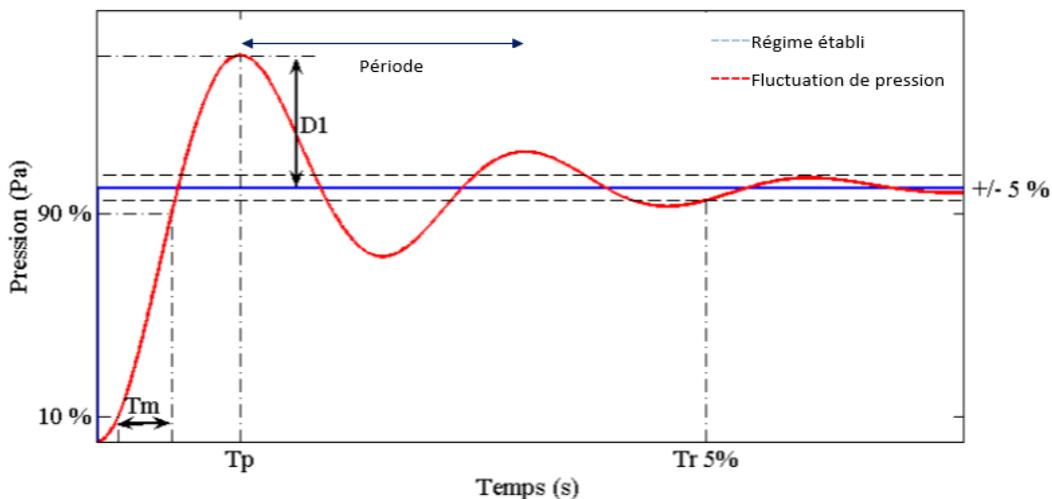


Figure 2 Différentes caractéristiques pour l'analyse d'un signal

La validation consiste à effectuer de telles simulations pour plusieurs cas en modifiant soit la résistance, la longueur ou la section de chaque conduit ainsi que le volume de la zone. Les quatre caractéristiques calculées sont ensuite comparées aux résultats de LeRoux [LeROUX(2011)].

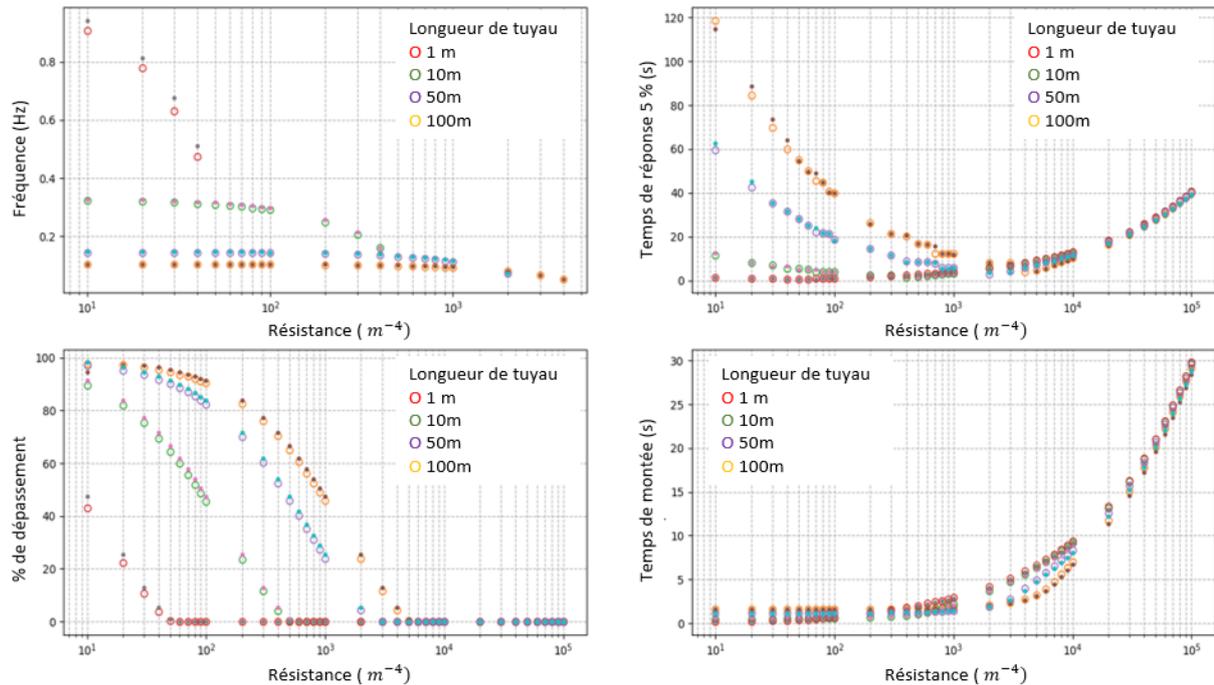


Figure 3 Résultats de Mathis (‘.’) et LeRoux (2011) (‘o’)

La figure 3 montre que les résultats de MATHIS correspondent à la référence et valident ainsi la capacité de MATHIS à reproduire les fluctuations de pression interne dans des conditions incompressibles et isothermiques. Les résultats montrent également que certains cas ne sont pas sujets à des fluctuations de pression interne, ce qui suggère que l’hypothèse quasi statique est valide. Pour les cas avec des fluctuations de pression internes, les amplitudes ainsi que les échelles de temps sont différentes et s’expliquent par les différents paramètres géométriques. L’inertie (par la longueur du conduit) et le volume de la zone ont tous deux un effet élevé sur cette fluctuation. Les tendances générales peuvent être décrites comme : 1) plus le diamètre de l’ouverture est grand, plus l’amplitude de fluctuation de pression interne est élevée ; 2) plus la longueur des conduits est petite plus la valeur de la fréquence de fluctuation est grande; 3) La résistance à l’air joue un rôle important dans la dissipation et l’atténuation des fluctuations. Une étude paramétrique est effectuée à l’aide de ces paramètres pour étudier de nombreux cas, qui seront traités et généralisés ci-dessous. Le volume de la zone, le diamètre des ouvertures, la vitesse du vent et la pente de l’échelon de pression seront variés dans cette étude. La figure 3 montre également que certaines approches adimensionnelles pourraient être faites pour fusionner les différents cas en une seule courbe. Cette approche est proposée dans la partie suivante à partir des formulations mathématiques.

4. FORME ADIMENSIONNELLE ET VALIDATION DE LA NOTION DE QUASI-STATICITE

La conservation de l'énergie sur une branche, en conditions isothermes, est présentée par l'équation généralisée de Bernoulli et est écrite sous la forme suivante :

$$L \frac{d\dot{m}}{dt} = (P_i - \rho_i g z_i) - (P_j - \rho_j g z_j) + \rho g [(z_{ai} + z_i) - (z_{aj} + z_j)] + \Delta P_{\text{loss}} \quad (1)$$

Avec L : longueur (m), P : pression (Pa), \dot{m} : flux de masse (kg/s), ρ : densité (kg/m³), g : accélération gravitationnelle (m/s²), z : altitude (m), dt : temps (s), \dot{m} : débit de masse. Les deux ouvertures sont identiques, horizontales et à la même altitude. Le terme d'expression gauche (1) est ainsi réduit aux pertes de pression des conduits. Les pertes de pression de tuyaux ne sont également prises en compte que par leurs pertes de pression singulières (LeRoux (2013)) qui ont mené à l'expression (2) de l'expression (1) ci-dessus.

$$\Delta p_{\text{loss}} = \frac{L \rho dQ}{S dt} + \zeta \frac{\rho (\dot{Q})^2}{2S^2} \quad (2)$$

Avec Q : débit volumétrique (m³/s), S : surface d'ouverture des conduits (m²), ζ : singularité (sans dimension)

L'équilibre de masse dans le nœud interne s'exprime par expression (3) :

$$\frac{d\rho V}{dt} = \sum_i \rho Q_i^* + \sum_j \rho Q_j^* \quad (3)$$

Le Roux a établi son modèle adimensionnel à partir de l'adimensionnement des équations de bilan énergétique et massique présentées ci-dessus. Pour cela, des grandeurs de références sont introduites, permettant de définir une variable adimensionnelle pour chacune des variables dimensionnelles.

Ces grandeurs de références sont utilisées pour adimensionner les équations d'équilibres d'énergie et de masse, des termes adimensionnels sont retirés de ces équations adimensionnelles.

Les grandeurs de référence ainsi que les variables adimensionnelles, utilisées aussi dans cette étude, sont présentées dans la figure 4 ci-dessous.

Variable	Grandeur de référence	Variable adimensionnelle
Volume des locaux	V_{ref}	$V^* = \frac{V}{V_{ref}}$
Longueur des branches	L_{ref}	$L^* = \frac{L}{L_{ref}}$
Section des branches	S_{ref}	$S^* = \frac{S}{S_{ref}}$
Masse volumique	ρ_{ref}	$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$
Vitesse	U_{ref}	$U^* = \frac{U}{U_{ref}}$
Pression aux nœuds	$P_{ref} = \rho_{ref} U_{ref}^2$	$P^* = \frac{P}{\rho_{ref} U_{ref}^2}$
Débit dans les branches	$Q_{ref} = S_{ref} U_{ref}$	$Q^* = \frac{Q}{S_{ref} U_{ref}}$
Résistance aéraulique	R_{ref}	$R^* = \frac{R}{R_{ref}}$
Temps	$t_{ref} = L_{ref}/U_{ref}$	$t^* = \frac{t}{L_{ref}/U_{ref}}$
Concentration	C_{ref}	$C^* = \frac{C}{C_{ref}}$

Figure 4 grandeurs de références et grandeurs adimensionnelles

Considérant plusieurs références pour chaque variable physique [LeROUX], l'expression (2) et (3) peuvent s'exprimer sous une forme adimensionnelle telle qu'elle est présentée dans l'expression (4) et (5) respectivement [DEMOUGE 2017][MELIS 2008].

$$\frac{\rho^* L^*}{S^*} Q^* = \Delta P^* - (R_{ref} S_{ref}^2) \rho^{*2} R^* Q^{*2} \quad (4)$$

$$\frac{dP_{2x}}{dx} = \left(\frac{P_{atm} S_{ref} L_{ref}}{\rho_{ref} U_{ref}^2 V_{ref}} \right) \left(\frac{\sum_i Q_i^* + \sum_j Q_j^*}{V^*} \right) \quad (5)$$

Avec P_{atm} : pression atmosphérique, S_{ref} : zone d'ouverture des canaux, L_{ref} : longueur du conduit, ρ_{ref} : densité, U_{ref} : vitesse en fonction de l'entrée de pression ($P_{entrée} = \rho_{ref} U_{ref}^2$), V_{ref} : volume de zone, R_{ref} : résistance aéraulique.

Les expressions ci-dessus donnent deux dimensions qui décrivent le nouveau système d'équilibre énergétique et d'équilibre de masse :

$$A_1 = R_{ref} S_{ref}^2 \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{P_{atm} S_{ref} L_{ref}}{P_{entrée} V} \quad (7)$$

Afin d'obtenir une courbe généralisée qui inclut toute les variations de fréquence dans tous les cas étudiés, quelques arrangements ont dû être faits. Le nombre de Strouhal est introduit puisque la fréquence des fluctuations est rattachés aux deux nombres ci-dessus. Enfin, l'expression (8) et (9) ci-dessus ont atteint l'objectif d'avoir une seule tendance pour les 13 cas simulés. Le nombre de T_x n'est pas sans dimension puisque la section carrée (qui est semblable à une unité de résistance) reste toujours dans l'expression. Il a été introduit pour fusionner les cas qui présentaient différentes sections de conduits.

$$T_x = \frac{R_{ref} V_{ref} P_{entrée}}{P_{atm} S_{ref} L_{ref}} \Leftrightarrow \frac{A_1}{A_2 * S_{ref}^2} \quad (8)$$

$$T_y = \frac{f \sqrt{\rho_{ref}} V_{ref} L_{ref}}{\sqrt{P_{atm} S_{ref}}} \Leftrightarrow \frac{\text{Strouhal}}{\sqrt{A_2}} \quad (9)$$

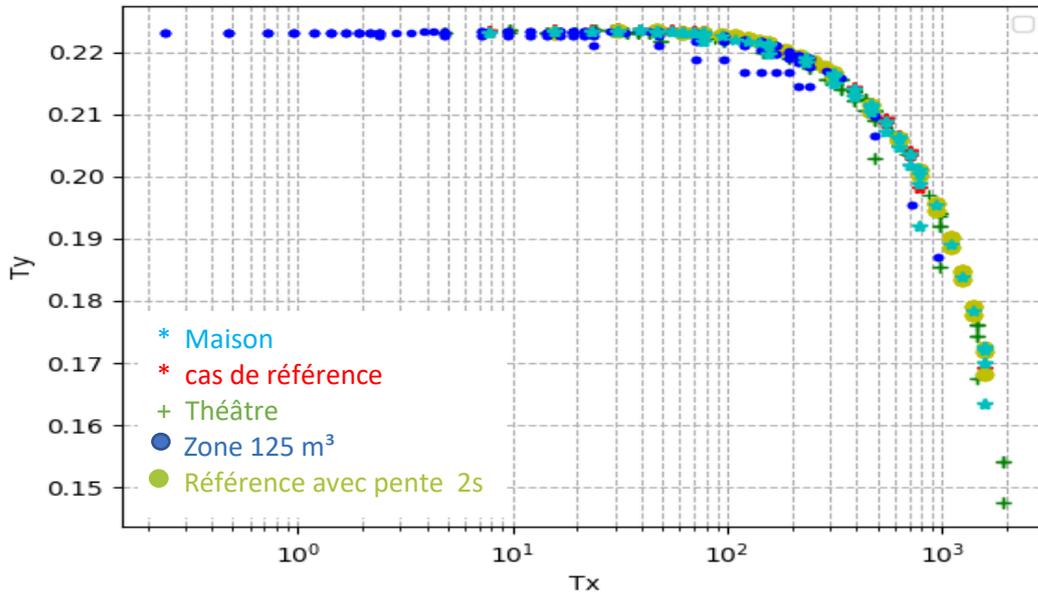


Figure 5 Généralisation des courbes de fréquences

T_y est sans dimension comme indiqué dans l'équation (9). Il contient la valeur de fréquence à travers le nombre de Strouhal. La figure 5, basée sur ces deux termes, montre la superposition de tous les cas de l'étude paramétrique. En utilisant de tels résultats globaux, en cas de valeur T_x supérieure à 10^4 , aucune fréquence ne serait détectée et donc aucune fluctuation de pression à l'intérieur de la zone. En dessous de cette valeur, l'hypothèse quasi statique n'est pas valable : des étapes de temps plus bas et une non-stationnarité doivent être prises en considération lors de la simulation des systèmes de ventilation. Il faut également garder à l'esprit que la fluctuation pourrait présenter de très petites dépassements pour lesquels l'hypothèse, même si elle n'est pas strictement valide, pourrait encore être appliquée sans erreurs importantes pour les applications d'ingénierie.

Compte tenu de la fréquence qui pourrait se produire dans les fluctuations de pression, la valeur T_y est calculée à l'aide du nombre de Strouhal, la valeur maximale de T_y est de 0,225 obtenue à la figure 5. Par conséquent, en variant la valeur de n'importe quel paramètre de T_x , nous pouvons calculer la valeur de la fréquence à travers le point d'intersection avec le graphique de la figure 5 qui peut être un moyen à une prédiction rapide si nous avons la fréquence des fluctuations ou si la situation est sûre.

Par conséquent, dans un premier temps et afin de concevoir le processus de simulation et son hypothèse obligatoire soulignée, on peut mettre en évidence une fluctuation de pression interne potentielle en utilisant le graphique et la relation des termes T_x et T_y .

Par exemple si nous avons un théâtre avec un volume de 11371 m³ et un conduit où ($L = 1\text{m}$, $D = 2,42\text{m}$ et $R = 10\text{m}^{-4}$). La vitesse du vent est de 10 m/s donc $T_x = 29,9$. L'intersection avec le graphique donne $T_y = 0,223$. On peut donc avoir une fluctuation, pour cela on va calculer f à partir de T_y pour

vérifier si elle est considérable. $f= 1,29$ donc cette fluctuation doit être prise en considération et une étude détaillée doit être effectuée.

5. CONCLUSION

Dans cette étude, le logiciel MATHIS est utilisé pour analyser, par simulation paramétrique sur un cas simple, la fluctuation de pression interne sous plusieurs échelons de pression des conditions limites. Après la validation de MATHIS en conditions instationnaires, il est utilisé pour simuler plusieurs cas, en changeant soit les paramètres géométriques, les caractéristiques de pression des conduits, le volume de la zone et la pente de la rampe des conditions de limite (à partir d'instantané jusqu'à 1s). Les résultats sont analysés sous une forme adimensionnelle afin de fusionner tous les cas en deux termes uniques. Ces deux permettent de montrer si une fluctuation est présente et de calculer la fréquence de cette fluctuation sous pression en fonction d'un ensemble de paramètres. Il faut également garder à l'esprit que la fluctuation pourrait présenter de très petits dépassements pour lesquels l'hypothèse, même si elle n'est pas strictement valide, pourrait encore être appliquée sans erreurs importantes pour les applications d'ingénierie.

D'après cette étude, les étapes suivantes concernant la génération de la turbulence en série temporelle selon des spectres du vent et des vitesses moyennes mesurées seront basés sur une étude non quasi-statique et cela à renforcer l'idée de l'impact de la turbulence du vent sur les l'intérieur du bâtiment.

6. REMERCIEMENT

Ce document et la recherche qui le sous-tendait n'auraient pas été possibles sans le soutien exceptionnel de mes superviseurs, de mes directeurs et de toute l'équipe de mes instituts qui collaborent.

7. REFERENCE

- François Demouge. Mathis: guide technique. [Rapport de recherche] 17.053 L –V0/FR, CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment. 2017
- Haghighat, Fariborz, Jiwu Rao, et Paul Fazio. 1991. « The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates—a Modelling Approach ». *Building and Environment* 26 (2): 95-109. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(91\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(91)90017-6).
- Holmes J. D. (1979). Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proceedings, *5th International Conference on Wind Engineering, Fort Collins*, July 1979, p. IV-8-1
- Le Roux N. Etude par similitude de l'influence du vent sur les transferts de masse dans les bâtiments complexes. *PhD thesis, University of La Rochelle*; 2011.
- Le Roux N, Reduced-scale study of transient flows inside mechanically ventilated buildings subjected to wind and internal overpressure effects, *Building and Environment*, (2013)
- Mounajed La modélisation des transferts d'air dans les bâtiments. Application à l'étude de la ventilation, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1989
- Stéphane Mélis, Philippe Querre, Laurent Ricciardi, Physical modeling of the SYLVIA code, *IRSN*, 2008-02